ChinaXiv合作期刊

中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设

白永飞[1,2,3*]　赵玉金[1,2]　王　扬[1,2]　周楷玲[1,3]

1 中国科学院植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室 北京 100093
2 中国科学院植物研究所 内蒙古草原生态系统定位研究站 北京 100093
3 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100049

chinaXiv:202303.08973v1

摘要　北方草地是我国重要的绿色生态屏障，也是黄河、长江、澜沧江、滦河等江河的发源地和水源涵养区，其对保障我国生态安全，提升生态系统服务和生态系统稳定性具有极其重要的作用。长期以来，我国在畜牧业生产中重视草地的生产功能，而忽视其生态功能，导致生产功能过度利用，以及生态系统服务和生态功能降低，继而严重威胁着我国的生态安全。开展北方草地生态系统服务评估，制定北方草地主体功能区划，是构建和优化生态安全屏障体系，科学配置草地的生态-生产功能，推进生态文明，统筹山水林田湖草一体化保护和修复，建设“美丽中国”，实现人与自然和谐共生的国家重大科技需求。文章基于北方草地生态系统服务和资源环境条件的空间分异规律，将北方草地划分为 7 个功能区、25 个亚区。该生态功能区划将为制定区域国土空间规划，科学布局重要生态系统保护和修复重大工程，统筹推进生态保护和修复工作提供重要的科技支撑。

关键词　中国北方草地，生态系统服务，生态系统服务价值评估，生态功能分区，生态-生产功能合理配置，生态安全屏障

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200515003

草地是陆地生态系统的重要组成部分，不仅为人类提供了肉、奶、皮、毛等具有直接经济价值的产品，同时具有调节气候、涵养水源、防风固沙、生物多样性保育、初级生产力和碳固持等极其重要的生态服务功能[1,2]。据统计，世界草地总面积 5.25×10^9 hm^2，占地球陆地总面积的 40.5%（不包括格陵兰岛和南极）；储存了陆地生态系统总碳量的 34%，维持着 30% 的净初级生产力；提供了全球约 30%—50% 的

*通讯作者
资助项目：中国科学院野外站联盟项目（KFJ-SW-YW037），国家重点研发计划项目（2016YFC0500804）
修改稿收到日期：2020年5月31日

畜产品[1]。草地主要分布在干旱和半干旱区，占干旱和半干旱区总面积88%，养育了25%的世界人口。

我国是世界草地资源大国，拥有草地总面积近4×10^8 hm²，占国土总面积的41.7%[3]。其中，中国北方草地总面积约3×10^8 hm²[4]，主要分布在新疆、西藏、青海、甘肃、四川、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北、辽宁、吉林、黑龙江等13个省份，涵盖了中国11个重点牧区。我国北方草地以内蒙古高原呈连续分布的温性草原为主体，构成了欧亚大陆草原的东翼。根据中国草地分类系统，我国天然草地划分为18个大类。其中，广泛分布于我国北方的温性草原、低地草甸、山地草甸、高寒草原、高寒草甸和温性荒漠等类型，占全国天然草地总面积的85%以上，构成了我国天然草地的主体（图1）；是我国北方地区重要的绿色生态安全屏障，同时也是黄河、长江、澜沧江、滦河等主要江河的发源地和水源涵养区[2,3]。因此，北方草地对保障我国的生态安全，提升生态系统服务和稳定性具有极其重要的作用[2]。

我国约有90%左右的天然草地处于不同程度的退化之中，其中严重退化草地占60%以上。长期过度放牧、草地开垦为农田、气候变化、国家投入不足和牧区政策偏差是导致我国草原大面积退化的主要原因[2,5,6]。长期以来，我国在畜牧业生产中重视草原的生产功能，忽视其生态功能，导致生产功能过度利用，草原超载过牧、滥挖、滥垦等问题十分突出。20世纪60—80年代大面积的优质草场被开垦为农田，这是我国草原退化、生态功能和生态系统服务功能降低的最主要原因。自然因素中，气候变暖、干旱和虫鼠害等也加速了草原退化。同时，草原管理政策的偏差及管理水平相对落后也是导致我国草原退化的重要因素之一[2,5,6]。例如，我国牧区政策和经营管理模式多数照搬和套用农区，但草原牧区环境条件和生产特点与农区有很大不同。草原牧区的环境条件脆弱、气候波动性大、自然灾害多，水分是草地初级生产力最主要限制因子；同农产品生产过程相比，畜产品生产过程更加复杂，既包括植物性生产，又包括动物产品的生产；牧区的生产基础薄弱、经营粗放、利润大量流转；草地管理中需要协调生态功能和生产功能，实现人-草-畜和谐发展。大量研究表明，过度放牧

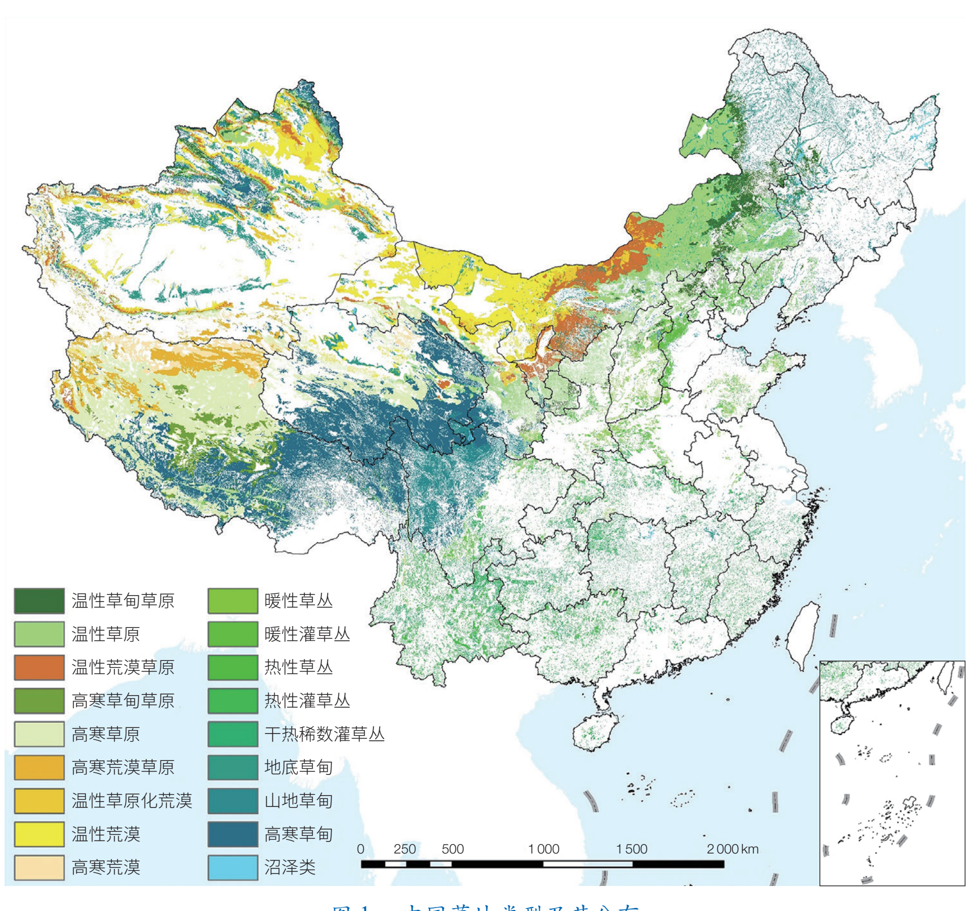


图1　中国草地类型及其分布
（港澳台地区数据缺失）

chinaXiv:202303.08973v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

使植被覆盖度和初级生产力降低，生物多样性减少，土壤养分和水分保持能力下降；土壤侵蚀和水土流失加剧，对气候变化的敏感性增强。从而严重地影响了不同时空尺度上的生态系统功能，加速了草地的退化演替；进而使草地生态系统服务功能日益衰减，虫鼠害和沙尘暴等灾害频繁发生。这严重威胁着我国北方及其周边地区的生态安全[5-7]。2000 年以来，我国先后实施了京津风沙源治理工程、退牧还草工程、草原生态保护奖励补助政策等，草原生态明显改善。然而，我国北方草地“局部改善、总体恶化”“治理速度赶不上退化速度”的被动局面亟待从根本上扭转，牧区“人-矿-草-畜”之间的突出矛盾亟待解决，草牧业生产亟待创新发展的理念。

厘清我国北方草地生态系统服务现状和空间格局，开展生态系统服务评估，制定北方草地主体功能区划，是构建和优化生态安全屏障体系，科学配置草地的生态功能和生产功能，推进生态文明、统筹山水林田湖草一体化保护和修复，建设“美丽草原”和“美丽中国”，实现人与自然和谐共生的国家重大科技需求。我国北方草地生态系统服务评估和主体功能区划成果，将为制定区域国土空间规划，科学布局重要生态系统保护和修复重大工程，统筹推进生态保护和修复工作提供重要的科技支撑。

1 生态系统服务及其价值评估

1.1 生态系统服务评估

生态系统服务是指生态系统提供的用以维持和实现人类生存与发展的环境条件和过程，是人类从生态系统获得的惠益，是人类赖以生存和发展的基础[8,9]。生态系统服务包括 4 个维度：支持服务、供给服务、调节服务和文化服务[9]。生态功能指生态系统各组分（如物质库）的大小及其过程（如物质循环、能量流动）的速率，包括初级生产力、碳固持、水源涵养、防风固沙、生物多样性维持等，其核心内涵是生态系统的支持服务和调节服务。生产功能是指生态系统为人类提供各种消费产品和资源（供给服务），包括家畜产品、牧草产品、食用和药用植物等[2]。

为准确评估我国草地生态系统的碳储量现状和变化，中国科学院战略性先导科技专项“生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”（以下简称“碳专项”）设立了“中国草地生态系统的固碳现状、变化和机制”研究课题（2011—2015 年）（以下简称“草地课题”）。该课题在全国不同草地类型共设置了 4 207 个调查样地，采用统一的调查、取样和测试方法，通过数据集成分析并结合遥感和模型手段，估算了我国草地初级生产力、植被和土壤的固碳现状与潜力[10]。本文中，全国草地的初级生产力、植被和土壤碳储量及固碳速率采用了作者主持的碳专项草地课题的部分研究结果。同时，参考其他相关研究的结果，估算了草地生态系统的水源涵养、防风固沙和生物多样性维持服务。

*（1）初级生产力。*全国天然草地植被地上生物量为 5.43 亿吨，地下生物量为 48.36 亿吨，其中内蒙古、新疆、青海、西藏、四川、甘肃、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西和陕西 13 个省份地上和地下生物量分别占全国总地上、地下生物量的 68.13% 和 83.8%。基于植被生产力实测数据，估算出的我国草地植被净初级生产力（NPP）为 1.474×10^9 t · a^{-1}，平均为 4.99 t · hm^{-2} · a^{-1}，但不同草地类型之间 NPP 的差异非常大。

*（2）碳固持。*中国草地总碳储量为 28.95 Pg C，其中植被碳库储量为 1.82 Pg C，土壤有机碳库储量为 27.13 Pg C。从空间分布来看，我国草地碳密度和碳储量均呈现从西北向东南逐渐降低的趋势（图 2）。其中，内蒙古、新疆、青海和西藏 4 个省份草地分布面积最广，草地碳储量最大，分别为 6.80、6.13、5.68 和 5.40 Pg C，合计占我国草地总碳储量的 60%。其次是四川、黑龙江、云南和甘肃，碳储量分别为

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

2.97、2.28、1.70 和 1.46 Pg C，贡献了全国草地碳储量的 21%。其他 23 个省份由于草地分布面积较小或总碳密度相对较低等原因，草地碳储量仅占全国草地碳储量的 19%。与森林不同，草地植被碳的绝大部分被储存在地下根系中，根系碳储量占草地植被碳储量的 92%。土壤碳库作为草地生态系统碳储量最主要的组成部分，其碳密度为植被碳密度的 19 倍。我国草地植被平均固碳速率为 250 t C · hm^{-2} · a^{-1}，年固碳量为 1 215 Tg C。这与遥感模型反演结果基本一致——基于 1981—2013 年遥感植被指数（NDVI）数据和 CASA 模型反演估算我国草地植被年固碳量为 1 160 Tg C。从草地类型上，高寒草地植被年固碳量为 734 Tg C，温性草地为 182 Tg C，暖性和热性草丛/灌草丛为 56 Tg C，隐域性草甸类草地等为 233 Tg C。各省份中，草地面积大的省份其年净固碳量也高，其中西藏、青海、四川、内蒙古和新疆分别占全国草地年固碳量的 34%、20%、12%、9% 和 9%。

（3）水源涵养。基于土地覆被、降水、NDVI 等

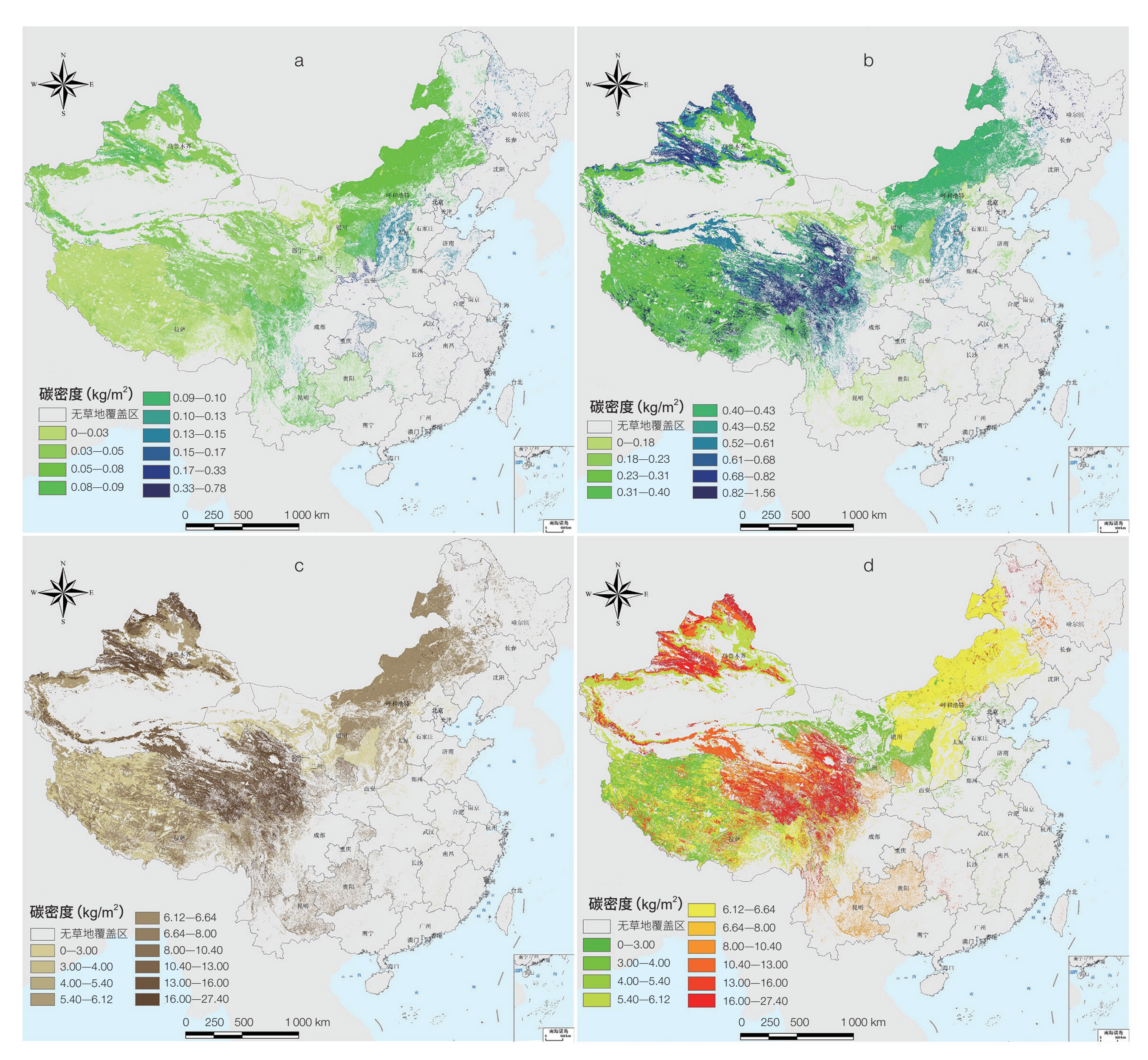


图 2　中国草地植被地上（a）- 地下（b）、土壤（c）和生态系统（d）总碳密度的空间分布
（港澳台地区数据缺失）

chinaXiv:202303.08973v1

数据，采用降水贮存量法估算的中国草地1980—2000年平均水源涵养量为$1.1617\times10^{11}\ m^3\cdot a^{-1}$，其中我国北方草地为$3.747\times10^{10}\ m^3\cdot a^{-1}$。2000—2010年中国草地平均年水源涵养量为$1.1838\times10^{11}\ m^3\cdot a^{-1}$，其中北方草地为$4.093\times10^{10}\ m^3\cdot a^{-1}$[11]。北方草地水源涵养服务的空间异质性较大，主要集中在青藏高原和内蒙古高原中东部区域，其中西藏草地1990—2010年平均水源涵养量为$2.749\times10^{10}\ m^3\cdot a^{-1}$[12,13]；内蒙古锡林河流域草地（9 786 km^2）水源涵养量为$4\times10^7\ m^3\cdot a^{-1}$[14]。

（4）防风固沙。防风固沙是干旱与半干旱草地提供的重要生态系统服务，其物质量可以通过风蚀模型，如修正的风蚀方程模型（RWEQ）和土壤流失方程（RUSLE），进行估算。相关研究对我国北方草地部分区域开展了防风固沙量的估算。例如，孙建等[15]利用修正的通用土壤流失方程估算1984—2013年青藏高原草地防风固沙量为$2.72\times10^7\ t\cdot a^{-1}$；孙文义等[16]估算黄土高原草地1990—2010年防风固沙量为$7.7\times10^9\ t\cdot a^{-1}$；王洋洋等[17]利用RWEQ模型估算的宁夏草地2000—2015年防风固沙量为7.298×10^6—$4.120\times10^7\ t\cdot a^{-1}$；江凌等[18]对内蒙古草地的防风固沙量估算值为$5.758\times10^9\ t\cdot a^{-1}$。

（5）生物多样性维持。据不完全统计，全国草地植物共计254科、4 000多属、9 700多种。其中，有毒植物52科、138属、316种[19,20]。另外，我国草原区繁衍的野生动物达2 000多种，其中国家一级保护动物14种、二级保护动物30多种。丰富的生物多样性资源构成了我国野生动植物资源基因库，特别是耐旱、耐寒、耐盐和药用植物最重要的基因库。目前，受长期过度放牧、开垦、气候变化、环境污染以及生物入侵等因素的影响，我国草地生物多样性明显降低，进而引起草地生态功能下降和生态系统稳定性的降低[21-23]。

1.2 生态系统服务价值评估

生态系统服务价值评估是制定区域生态环境保护、生态经济核算和生态补偿决策，开展生态功能区划，保护和恢复自然生态系统的重要依据和基础[24]。自1997年Costanza等[25]首次对全球主要生态系统类型开展服务价值评估以来，国内外研究学者对草地生态系统服务价值开展了大量相关研究工作[26]。我国全国草地生态价值核算可信度较高范围为0.87万亿—7.5万亿元人民币[26]。

依据相关文献值进行估算[27-30]，我国平均单位面积草地生态服务价值为1 920.5—4 475.8元/hm^{-2}。按北方草地面积约$3\times10^8\ hm^2$换算，北方草地生态服务价值为5 764.5亿—13 452.0亿元人民币。不同区域和草地类型的生态系统服务价值相差悬殊。其中，沼泽类草地生态系统服务价值最高，其次为暖性灌草丛、暖性草丛、低地草甸、温性草甸草原、温性草原、高寒草甸、高寒草原等，而高寒荒漠价值最低。从区域上看，内蒙古东部的呼伦贝尔、科尔沁和锡林郭勒草原，新疆西北部及青藏高原东部、东北部等地区的单位面积服务价值较高，而内蒙古中西部和青藏高原西部地区单位面积服务价值较低。

2 生态功能区划原则与方法

生态功能区划是根据区域生态系统类型、生态环境敏感性、生态系统受胁迫过程与效应，以及生态系统结构、过程和服务等特征的空间分异规律而进行的地理空间分区。1976年，美国生态学家Bailey首次从生态系统角度提出并编制美国生态区划方案。此后，国内外生态学家和国际组织对生态区划原则、指标体系、分区方法等进行了细化和完善[24,31]。我国生态区划起步相对较晚，最具代表性的是傅伯杰等[31]开展的中国生态功能区划。2008年，环境保护部和中国科学院联合发布《全国生态功能区划》，将全国划分为3类31个生态功能一级区，9类67个生态功能二级区，以及208个生态功能三级区。该区划明确了保障国家生态安全的重要区域，为我国自然资源合理管理

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

和可持续利用、经济社会与生态保护协调、健康发展提供了科学指导。2012年，谢高地等[24]在基于已有三级生态区划方案，以中国县域尺度为最小区划单元，将中国分成33个水源涵养功能区、57个水土保持功能区、19个防风固沙功能区、11个沿海防护功能区、62个产品提供功能区和86个生物多样性保护功能区。贾慎修等[3]在20世纪80—90年代开展的全国首次草原普查的基础上，结合地貌、土壤、植被等生态因素，以草地资源空间分异规律为原则，提出了我国首个草地资源区划。该区划将全国草地分为7个区、29个亚区、74个小区。然而，该区划以自然区划为主，未考虑人类活动和气候变化对草地生态系统结构、功能和服务的影响。

当前，面向生态文明、"美丽中国"建设和统筹山水林田湖草一体化保护和修复的国家重大战略需求，亟待构建我国草地特别是北方草地的主体功能区划；综合考虑草地生态服务和生态承载力，科学指导和合理配置草地的生态功能和生产功能，进而为制定区域国土空间规划，科学布局北方草地重要生态系统保护和修复重大工程，统筹推进生态保护和修复工作提供重要的科技支撑。

（1）我国北方草地生态功能区划原则。① 生态要素区域分异原则。以气候、地形、土壤、植被等自然要素的地域分异规律为依据。② 主导性原则。以草地类型区域分异为基础，气候、地貌等因素差异服从主要草地类型的分异，同时兼顾不同草地类型的生态系统服务，且非主导功能服从主导功能。③ 生态优先和绿色发展相结合原则。坚持生态优先、因地制宜的原则，兼顾草地生产和社会经济条件、草地利用强度、畜牧业布局和发展方向及草地经营管理、培育技术、自然保护地和国家公园等，合理配置生态功能和生产功能。④ 分级区划原则。照顾行政区界，特别是县域的完整性。

（2）我国北方草地生态功能区划方法。以草地类型、中国草地资源区划和生态服务功能区划为基础，综合考虑气候湿润度、地形、土壤、植被覆盖度等重要生态参数，生态系统服务（包括初级生产力、碳固持、水源涵养、防风固沙、生物多样性维持等），以及土地沙化、盐渍化等生态敏感性评价，兼顾县界完整性确定分区方案和各分区之间的界线（图3）。

3 生态功能区分区概述与实施措施

3.1 生态功能分区概述

以地名+草地类或亚类为命名方法，根据上述分区原则和方法，将我国北方草地划分为7个生态功能区，25个亚区（图4），各区的名称、主体生态功能、气候条件、主要问题和生态敏感性详见表1。

3.2 北方草地各生态功能区实施措施

面向统筹山水林田湖草一体化保护和修复、生态文明和"美丽中国"建设的国家重大需求，依据上述分区方案、各生态区面临的主要问题及其生态和环境敏感性，坚持生态优先的原则，综合考虑生态系统服务和生态承载力的空间分异，以合理配置草地的生态-生产功能为切入点，提出了各生态区应采取的重点措施。

（1）湿润半湿润草甸草原与草甸区。该区生态系统服务和生态功能的核心是水源涵养、碳固持、土壤保持和生物多样性保护。在实施措施上，坚持生态优先，生产-生态有机结合的原则，严格实施以草定畜，从根本上遏制超载过牧和草地退化的势头；采取禁牧、休牧、减牧、轮牧等管理措施，加速退化草地的恢复；严格限制矿产资源开发，保护黑土，禁止开垦草原等行为；采用乡土草种补播、土壤生物修复、施肥、松土、切根等措施，加速严重退化草地的恢复和重建；同时，创新草牧业发展方式，发展高效人工草地、优质草产品加工、草原特色生物种养技术，探索草牧业高质量发展的新模式。

（2）半干旱草原区。该区生态系统服务和生态功

chinaXiv:202303.08973v1

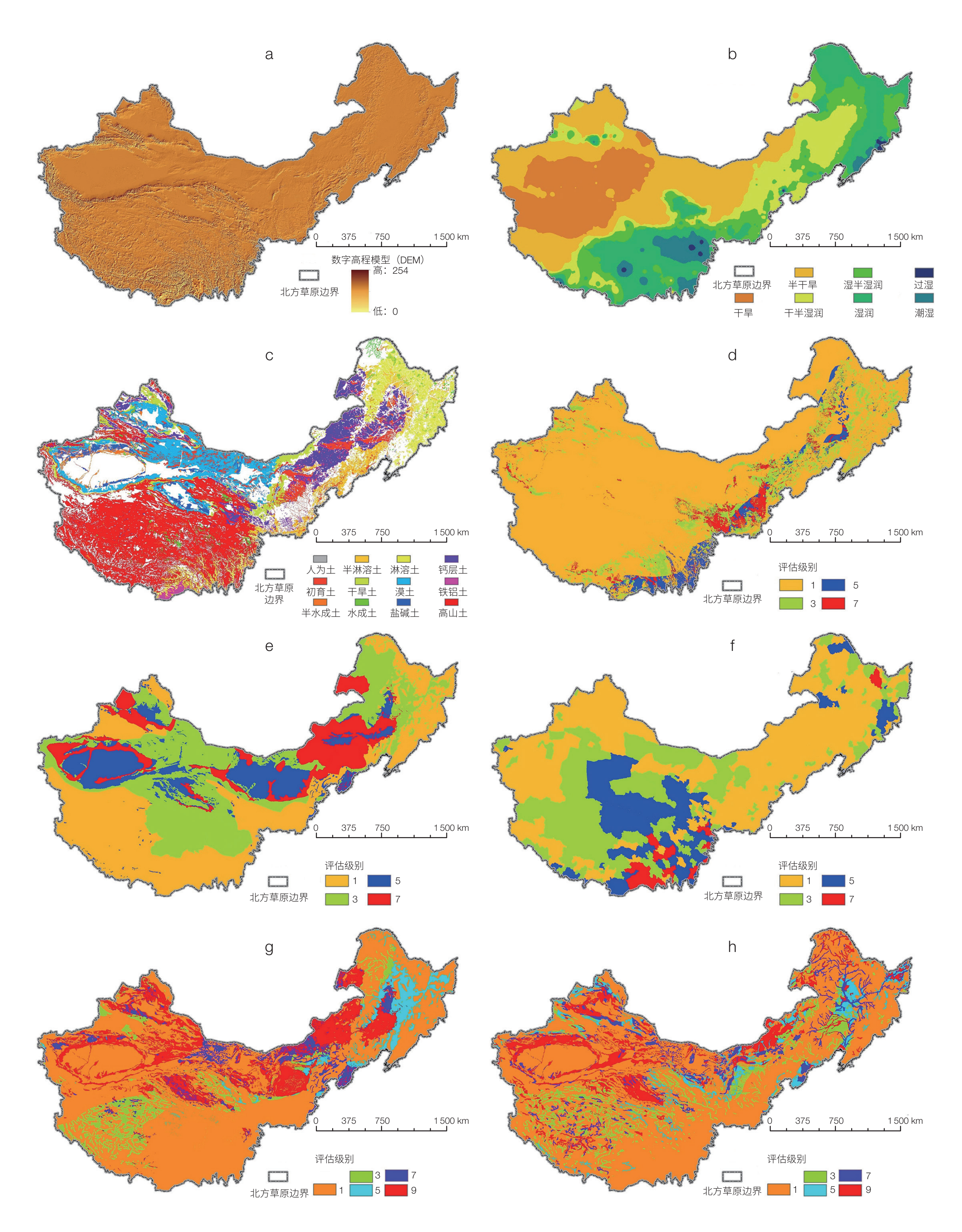


图3 我国北方草地地形（a）、气候（气候-湿润指数，b）、土壤（土壤类型，c；土壤保持重要性等级，d）、生态参数（防风固沙重要性评估，e；生物多样性维持与保护评估，f）及敏感性评估（沙漠化敏感性，g；盐渍化敏感性评估，h）

湿润指数来源于中国气象背景数据集（http://www.resdc.cn/DOI）；土壤类型来源于《1∶100万中华人民共和国土壤图》；生态系统服务与敏感性评估来源于中国生态系统评估与生态安全数据库（http://www.ecosystem.csdb.cn/ecoass/ecoplanning.jsp）

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

表 1　我国北方草地生态功能区分区概况、主体功能和生态敏感性

I 级区	亚区代码	亚区名称	亚区面积（hm^2）	主体功能	国家级自然保护区数量（占该亚区土地面积比）	气候条件			主要问题和生态敏感性
						年平均降水量（mm）	年平均温度（°C）	干燥度	
湿润半湿润草甸草原与草甸区	I-1	三江平原低地草甸亚区	1.0×10^{7}	水源涵养、碳固持、水文调节	14（17.8%）	558.5	2.9	0.9	湿地和沼泽面积减少，水源涵养和固碳能力降低，水文调节能力下降；气候变化和湿地开垦敏感区
	I-2	大、小兴安岭山地丘陵灌丛与草甸草原亚区	3.3×10^{7}	水源涵养、土壤保持、生物多样性保护	29（6.5%）	504.2	2.4	0.8	生物多样性减少、原始生态系统受到威胁；水土流失、生物多样性极敏感区
	I-3	长白山山地丘陵灌丛与草甸草原亚区	2.2×10^{7}	水源涵养、土壤保持、生物多样性保护	25（5.2%）	699.0	3.2	0.8	水土流失、水环境污染，植被退化、景观破碎化严重，土地生产力低；生物多样性、水土流失、气象灾害敏感区
	I-4	松嫩-辽河平原东部草甸与草甸草原亚区	2.0×10^{7}	土壤保持、水源涵养	17（1.5%）	603.0	5.1	0.9	草原退化、土壤沙化、盐渍化严重，土地生产力低；土壤侵蚀和土地沙化敏感区
	I-5	松嫩-辽河平原西部草甸草原与科尔沁沙地亚区	1.9×10^{7}	防风固沙、土壤保持	19（4.2%）	440.6	5.5	1.3	草地沙化、盐渍化、退化现象严重；气象灾害、流沙侵蚀、盐渍化敏感区
	I-6	大兴安岭南部丘陵草甸草原亚区	1.6×10^{7}	土壤保持、生物多样性保护	8（6.3%）	414.2	2.2	1.2	草原退化、沙化严重；生物多样性与土壤侵蚀高度敏感
	I-7	内蒙古高原东部草甸草原与呼伦贝尔沙地亚区	0.6×10^{7}	防风固沙、土壤保持、生物多样性保护	2（9.6%）	360.2	3.3	1.2	草原退化、沙化严重，土壤侵蚀、风沙危害严重；生物多样性敏感区
半干旱草原区	II-1	内蒙古高原中东部典型草原-浑善达克沙地亚区	2.5×10^{7}	防风固沙、土壤保持、生物多样性保护	5（7.7%）	307.0	1.8	1.4	草原退化、沙化严重；土地退化、生物多样性极敏感区
	II-2	内蒙古高原西部荒漠草原亚区	1.1×10^{7}	防风固沙、土壤保持	1（1.4%）	182.5	4.5	3.0	我国沙尘暴风沙源之一，土壤风蚀、流沙危害严重；生物多样性极敏感区
	II-3	黄土高原半干旱草原亚区	2.0×10^{7}	水土流失控制、防风固沙	8（1.5%）	417.6	6.4	1.4	土地沙化、风蚀和水蚀严重；水土流失、盐渍化和土壤侵蚀敏感区
	II-4	鄂尔多斯高原毛乌素沙地与荒漠草原亚区	1.3×10^{7}	生物多样性保护、防风固沙、土壤保持	5（7.5%）	238.7	6.0	2.8	草地退化、沙化和水土流失严重；生物多样性敏感区，土壤侵蚀高敏感区
暖性灌草丛区	III-1	燕山-太行山山地丘陵暖性灌草丛亚区	1.0×10^{7}	水源涵养、土壤保持	8（2.1%）	502.7	6.0	1.2	水土流失重、生态承载力低；土壤侵蚀敏感区
	III-2	华北东部平原丘陵暖性灌草丛亚区	0.5×10^{7}	生物多样性保护、水源涵养	3（0.6%）	530.7	11.7	1.4	干旱缺水、盐渍化严重；水胁迫高度敏感，地质灾害频发，西北部局部为沙化敏感区
	III-3	华北西部山地丘陵暖性灌草丛亚区	1.6×10^{7}	土壤保持	15（1.6%）	547.8	8.4	1.2	植被覆盖度低、水土流失严重；土壤侵蚀敏感区

（续表）

干旱荒漠-绿洲-山地草地区	IV-1	阿拉善高原-河西走廊荒漠亚区	4.9×10^7	防风固沙、生物多样性保护	14（12.2%）	105.2	5.5	8.7	草地退化、沙化严重，沙丘活化，威胁绿洲安全和生物多样性保护；土地退化高度敏感
	IV-2	阿尔泰-准噶尔盆地北部荒漠与山地草原亚区	2.0×10^7	防风固沙、土壤保持、生物多样性保护	5（2.0%）	177.0	2.5	5.2	草地退化、沙化严重，虫鼠害频发；生物多样性和生境高度敏感
	IV-3	天山北坡-准噶尔盆地南部荒漠和山地草原亚区	2.9×10^7	生物多样性保护、土壤保持	5（2.2%）	225.3	3.6	5.4	草地退化、沙化、水土流失、局地盐渍化严重；该区西部生物多样性和生境高度敏感，而东部土地退化和土壤侵蚀高度敏感
	IV-4	塔里木-柴达木盆地荒漠-绿洲亚区	16.0×10^7	防风固沙、生物多样性保护	3（6.5%）	66.1	8.5	11.2	草地退化、沙化、虫鼠害严重；土壤盐渍化不断加剧，危及绿洲和生物多样性；土地沙化高度敏感、盐渍化、生物多样性和生境极敏感
高寒草甸区	V-1	甘南高寒草甸亚区	0.4×10^7	水源涵养、生物多样性保护	1（21.0%）	589.7	0.7	1.1	过度放牧、超载严重，草地退化严重；土壤侵蚀和生多样性敏感区
	V-2	祁连山山地高寒草原亚区	1.3×10^7	生物多样性保护、防风固沙	4（7.5%）	336.4	2.9	1.9	草地退化、土地沙化严重，水源涵养能力下降；生物多样性及生境高度敏感，土地沙化与土壤侵蚀中轻度敏感
	V-3	三江源高寒草甸-高寒草原亚区	3.7×10^7	生物多样性保护、水源涵养	国家公园1个（100%）	391.7	5.1	1.0	草地退化、流动沙丘及沙害、荒漠化严重，生物多样性减少，水源涵养能力降低
	V-4	藏东-川西高寒草甸亚区	5.6×10^7	水源涵养、土壤保持	29（7.6%）	625.9	2.0	1.1	草地退化、荒漠化、水土流失和山地灾害严重，土壤侵蚀和野生动物生境高度敏感，沙化中度敏感；生物多样性敏感区
高寒草原区	VI-1	藏西南高寒草原-温性草原亚区	4.9×10^7	生物多样性保护、土壤保持	5（39.6%）	228.1	4.5	1.5	草地退化严重；沙化、盐渍化敏感性较高
	VI-2	藏西高寒草原区	2.4×10^7	生物多样性保护、土壤保持、水源涵养	3（18.8%）	335.5	0.9	1.6	草地退化严重；水土流失和沙化敏感性较高
高寒荒漠区	VII-1	昆仑山西段荒漠区	9.1×10^7	生物多样性保护	1（27.4%）	81.9	4.6	10.8	野生动物生境高度敏感

能的核心是防风固沙和土壤保持。在实施措施上，坚持生态优先、适度利用的原则，严格控制载畜量，遏制超载过牧、草地退化的势头，并将一部分生态空间和承载力还给野生动物；采用乡土草种补播、土壤生物修复等措施，加速修复沙化、风蚀、水蚀、水土流失、盐渍化草地，提升生态系统服务和稳定性；采取禁牧、休牧、减牧、轮牧等管理措施，从根本上解决草-畜矛盾，加速退化草地的恢复；严格限制矿产资源开发，禁止开垦草原；创新草牧业发展方式，适度发展生态旅游业，探索草原生态保护与草牧业高质量发

chinaXiv:202303.08973v1

ChinaXiv合作期刊

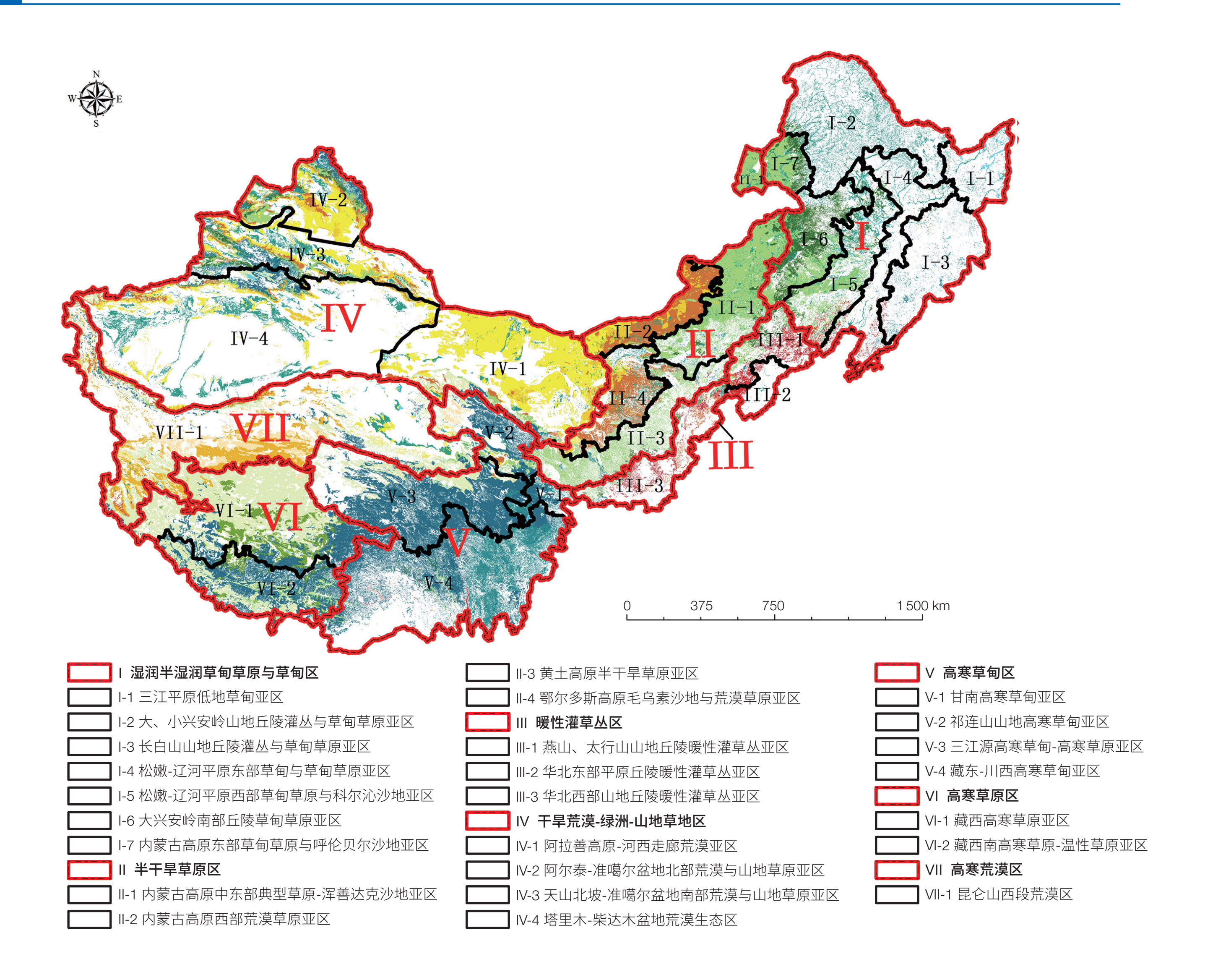


图 4　我国北方草地生态功能区划图

展的新范式。

（3）暖性灌草丛区。该区生态系统服务和生态功能的核心是水源涵养和土壤保持。在实施措施上，坚持保护优先，限制利用的原则，加大坡耕地退耕还草、还林；根据生态系统内在机理和规律，科学配置植被恢复中草-灌-乔的比例、植物-水分关系和人工植被群落结构，加速植被恢复，有效控制水土流失，提高生物多样性和生态系统稳定性；同时，在植被恢复中坚持以自然修复为主，工程措施为辅，加速退化草地的恢复；严格限制矿产开发；因地制宜适度发展生态旅游业。

（4）干旱荒漠-绿洲-山地草地区。该区生态系统服务和生态功能的核心是防风固沙、水土保持和生物多样性保护。干旱区人类生存和发展依托于绿洲系统，因此在实施措施上，坚持生态优先，根据水资源和生态承载力确定利用方式和利用强度，合理调配流域内的水资源，控制人工绿洲规模，发展节水农业，提高水资源利用效益；严格限制放牧等生产活动，保护荒漠植被；加大力度修复严重沙化、风蚀、水蚀、水土流失、盐渍化的草地；建立和完善以国家公园为主体的自然保护地体系，将大部分荒漠区纳入自然保护地，发展可控的荒漠和绿洲旅游业；探索脆弱荒漠

chinaXiv:202303.08973v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

草原生态保护与沙产业发展的新范式。

（5）高寒草甸区。该区生态系统服务和生态功能的核心是水源涵养、土壤保持和生物多样性保护。在实施措施上，坚持生态优先，生产-生态有机结合的原则，严格实施以草定畜，控制载畜量，从根本上遏制超载过牧；将部分生态空间和承载力还给野生动物，建立和完善以国家公园为主体的自然保护地体系，适度发展特色生态旅游业；采取禁牧、休牧、减牧、轮牧等管理措施，加速退化草地的恢复；采取乡土草种补播、土壤生物修复等措施加速严重退化草地的恢复和重建；探索草牧业高质量发展的新模式。

（6）高寒草原区。该区生态系统服务和生态功能的核心是生物多样性保护和水源涵养。在实施措施上，坚持生态优先的原则，控制人类活动强度和载畜量，将不小于 50% 的生态空间和承载力还给野生动物；建立和完善以国家公园为主体的自然保护地体系，严格限制脆弱高寒草原特色生态旅游业；采取禁牧、休牧、减牧、轮牧及杜绝乱樵滥采野生植物等管理措施，加速退化草地的恢复。

（7）高寒荒漠区。该区生态系统服务和生态功能的核心是生物多样性保护。实施措施上，应限制人类活动对自然生态系统的干扰，严格保护野生动植物资源，建立以国家公园为主体的自然保护地体系，将绝大部分生态空间还给野生动物。

4 实施北方草地生态功能区划的保障措施

实施北方草地生态功能区划对坚持生态优先，科学配置草地的生态功能和生产功能，统筹山水林田湖草一体化保护和修复，构建我国北方生态安全屏障体系，推进生态文明和“美丽中国”建设，实现绿色发展和高质量发展具有重要意义。为此，我们提出了实施北方草地生态功能区划的 8 项保障措施。

（1）划定生态保护红线，科学布局国土生态安全空间。基于各生态功能区的主体功能和生态敏感性，确定生态保护红线，推进和优化以国家公园为主体的自然保护地体系建设，稳步推进国家公园体制试点工作，完善国家级自然保护区空间布局，科学配置草地的生态功能，是实施北方草地生态功能区划、优化国土空间格局、筑牢我国北方生态安全屏障体系的重要举措。同时，加强北方草地生态功能区划实施同《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035 年）》（以下简称《总体规划》）的衔接，从自然生态系统演替规律和内在机理出发，科学布局北方重要生态系统保护和修复重大工程。目前，我国草地生产功能研究基础较好，但生态功能研究基础薄弱，应依托生态系统野外科学观测研究站网络，加强重要草地生态系统演替规律和内在机理研究，以及生态修复技术体系和试验示范模式研发工作，为实施《总体规划》提供科技支撑。

（2）统筹生态和生产用水比例，创新畜牧业发展模式。水分是北方草地生态系统服务的关键驱动因子。因此，基于水资源承载力及其空间分异和动态变化，统筹和优化生态、生产、生活等用水比例是维持和提升北方草地生态系统服务（包括初级生产力、碳固持、水源涵养、生物多样性保育、防风固沙、土壤保持等）的重要抓手，也是科学配置其生态功能和生产功能的重要基础。在湿润半湿润草原区、农牧交错区及部分绿洲区，根据水资源的承载力，利用部分进行轮作和休闲的耕地，发展适度规模的高效人工草地和营养体农业，从而提升饲草和饲料的生产力水平，减少畜牧业对天然草地的过度依赖，创新畜牧业发展模式，是加速退化草地恢复的有效途径。

（3）缓解牧区草-畜矛盾，提升草地生态功能。超载过牧是当前北方草地面临的突出问题，也是导致草地大面积退化的重要原因。坚持保护优先的原则，根据草地的退化程度和利用状况，因地制宜地采取禁牧、休牧、减牧、轮牧及打草场轮刈休闲等草地管理措施和技术，从根本上减轻长期过度利用对草地的压

chinaXiv:202303.08973v1

力。这是缓解牧区草-畜矛盾，加速退化生态系统自然恢复和自我修复，提升其生态功能的重要抓手。例如，内蒙古自治区从 2001 年开始探索春季休牧，即每年在牧草返青期的 4—5 月进行为期 30—60 天的休牧，加速退化草地的恢复。该项措施已在内蒙古、青海、西藏等省份大面积推广。一些长期坚持春季休牧措施的地区，其草地退化状况已明显好转。2020 年，黑龙江省决定对全省 17 个县（市、区）的草地集中连片进行每年为期 7 个月（4 月 15 日—11 月 15 日）的禁牧，进一步探索禁牧对草原生态修复的作用，推动畜牧业转型发展。

（4）根据草地退化程度和特点制定科学的修复策略。我国北方草地的大面积退化从 20 世纪 70 年代开始，经历了 50 多年的演变和发展过程。其中，90% 左右的天然草地发生了不同程度的退化，其中严重退化草地占 60% 以上。因此，草地生态系统保护和修复是一项长期的任务，应根据草地的退化程度和特点，因地制宜制定科学的修复措施。特别是对于重度退化草地，由于生态系统结构严重退化、功能严重丧失，其生态修复需要经过 3 个关键阶段，即植被建植、结构优化和功能提升（图 5）。① 植被建植阶段。需要解决的关键科技问题是如何构建以先锋植物为主的植物群落，实现由“黄（裸地或沙地）变绿”或由“黑（黑土滩）变绿”的目标，该阶段需要采用生物和工程措施相结合的修复技术。② 结构优化阶段。需要解决的关键科技问题是如何通过免耕补播乡土优势物种等措施，使原生群落的优势物种及其多度显著增加，先锋植物的多度逐渐减少，植物群落结构得到优化。③ 功能提升阶段。其科技目标是植物、土壤和土壤生物群落结构进一步优化，基本实现近自然恢复，其生态系统功能和稳定性显著提升。实现这 3 个关键阶段的修复目标需要十几年甚至几十年的时间，特别是土壤和土壤生物群落的恢复。因此，重度退化草地的生态修复工程，应根据这 3 个关键阶段的特点，制定相应的技术措施、修复目标和草地管理措施。例如，在植被建植阶段需要禁牧，在结构优化阶段只能轻度利



图 5　重度退化草地生态修复的 3 个关键阶段

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

用，而在功能提升阶段可以合理利用。

（5）提升饲草收获与加工的科技水平。我国草原牧区植物生长季较短，冬季漫长，风雪灾害频发，繁殖母畜的安全越冬很大程度上依赖于秋季收获的干草储备。目前，我国草原牧区饲草收获、打捆、加工和贮藏技术落后，同畜牧业发达国家相比具有很大的差距。牧草收获加工过程中由于干燥时间延长和叶片脱落引起的粗蛋白、维生素损失十分巨大，加上饲草储备设施简陋使干草品质进一步降低，不能满足繁殖母畜对饲草的营养和能量需求，草原畜牧业难以摆脱粗放、落后的经营模式。因此，亟待大力推广饲草收获、压扁、打捆、加工、贮藏等新装备、新工艺和新技术，提升饲草收获与加工的科技水平，实现饲草储备“粮食化”。

（6）实现牧民收入的多元化。探索适合我国草原牧区特点的家庭牧场、牧民协会、牧民合作社等规模化经营模式，创新和完善我国牧区科学发展的体制和机制。同时，适度发展生态旅游、民族文化、特色生物资源产业，实现牧民收入的多元化。

（7）完善草原生态保护补助奖励长效机制。进一步完善草原生态保护补助奖励机制，提高补奖标准，延长奖补年限，增加生态保护补助奖励资金在牧民家庭收入中占比，实现生态保护与牧民增收的“双赢”。同时，建立严格的保护成效监测、检查和考核机制，从根本上遏制超载过牧和草原大面积退化的势头。

（8）发展教育事业，提升牧区文化生活水平。大力发展义务教育、职业教育、高等教育和牧区社会事业，不断提高牧区人口素质、科学文化水平、健康水平和生活质量，实现科技移民、教育移民和发展移民，有效降低生态环境脆弱区的人口压力，促进民族团结和社会稳定。

参考文献

1 White R P, Murray S, Rohweder M. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystems. Washington: World Resources Institute, 2000.

2 白永飞, 黄建辉, 郑淑霞, 等. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制. 植物生态学报, 2014, 38(2): 93-102.

3 中华人民共和国农业部兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.

4 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997, 30(6): 1-9.

5 白永飞, 潘庆民, 邢旗. 草地生产与生态功能合理配置的理论基础与关键技术. 科学通报, 2016, 61(2): 70-81.

6 韩俊. 中国草原生态问题调查. 上海: 上海远东出版社, 2011.

7 杜青林. 中国草业可持续发展战略. 北京: 中国农业出版社, 2006.

8 Daily G C. Nature’s Services Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997.

9 Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being. Washington DC: Island Press, 2005.

10 白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究. 植物生态学报, 2018, 42(3): 261-264.

11 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. 水土保持研究, 2016, 23(5): 256-260.

12 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.

13 黄麟, 曹巍, 吴丹, 等. 西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征. 自然资源学报, 2016, 31(4): 543-555.

14 张雪峰, 牛建明, 张庆, 等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局. 干旱区研究, 2016, 33(4): 814-821.

15 Sun J, Liu Y, Zhou T C, et al. Soil conservation service on the Tibetan Plateau, 1984-2013. Earth & Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2019, 109(3-4): 445-451.

16 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

服务功能评价. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-376.

17 王洋洋, 肖玉, 谢高地, 等. 基于RWEQ的宁夏草地防风固沙服务评估. 资源科学, 2019, 41(5): 980-991.

18 江凌, 肖燚, 饶恩明, 等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747.

19 徐柱, 闫伟红, 刘天明, 等. 中国草原生物多样性、生态系统保护与资源可持续利用. 中国草地学报, 2011, 33(3): 1-5.

20 赵宝玉. 中国天然草地有毒有害植物名录. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.

21 Bai Y F, Wu J G, Clark C M, et al. Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(6): 1204-1215.

22 Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(5): 1023-1034.

23 Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431(7005): 181-184.

24 谢高地, 张昌顺, 张林波, 等. 保持县域边界完整性的中国生态区划方案. 自然资源学报, 2012, 27(1): 154-162.

25 Costanza R, D’Arge R, de Groot R, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. Nature, 387(6630): 253-260.

26 Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Applying value transfer method for eco-service valuation in China. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(1): 51-59.

27 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.

28 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.

29 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 45-50.

30 谢高地, 张钇锂, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.

31 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 2-7.

Assessment of Ecosystem Services and Ecological Regionalization of Grasslands Support Establishment of Ecological Security Barriers in Northern China

BAI Yongfei[1,2,3*] ZHAO Yujin[1,2] WANG Yang[1,2] ZHOU Kailing[1,3]

（1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

2 Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Grassland ecosystems of Northern China, the headwaters region and water resource conservation areas for the Yellow River, the Yangzi River, the Lancang River, and the Luanhe River, are important ecological security barriers in China. They play extremely important roles in maintaining multiple ecosystem functions and services and sustaining multinational cultural diversity. However,

* Corresponding author

ChinaXiv合作期刊

the grassland ecosystems of Northern China have experienced widespread deterioration in functions and services since the last several decades due to the overexploitation of production functions at the cost of their ecological functions. Therefore, assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands in Northern China are needed for optimizing their production functions and ecological functions, establishing ecological security barriers, and achieving ecological civilization. Based on the spatial patterns of key ecosystem services and environmental conditions, we propose seven ecoregions and twenty-five sub-ecoregions across grassland ecosystems in Northern China. The ecological regionalization of grasslands can be used to guide sustainable grassland management, restoration of degraded grasslands, and biodiversity conservation in Northern China.

Keywords grasslands of Northern China, ecosystem services, value of ecosystem services, ecological regionalization, optimizing production functions and ecological functions, ecological security barrier



白永飞 中国科学院植物研究所研究员、博士生导师，中国科学院大学岗位教授，中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站站长。2008年国家杰出青年科学基金获得者，2011年入选内蒙古自治区“草原英才”。主要研究领域：草原生物多样性与生态系统功能的形成和维持机制，生态系统服务对全球变化驱动因子的敏感性和响应机制；退化草原修复与生态系统管理。发表各类研究论文150余篇，其中 *Nature*、*PNAS*、*Ecology Letters*、*Ecology*、*Journal of Applied Ecology*、*Global Change Biology* 等SCI期刊论文120余篇。E-mail: yfbai@ibcas.ac.cn

BAI Yongfei Principle Investigator and Ph.D. Supervisor of Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (CAS), Professor of the University of Chinese Academy of Sciences, and Director of the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, CAS. He won the “Distinguished Young Scholar Program” of the National Natural Science Foundation of China (NSFC) in 2018. He serves as the President of the Plant Ecology Branch of the Chinese Society for Plant Sciences. His main research areas include: relationships between biodiversity and multiple ecosystem functions; sensitivity and responses of ecosystem services to global change drivers; and restoration of degraded grasslands and ecosystem management. He has published more than 150 papers in peer reviewed journals, such as *Nature*, *PNAS*, *Ecology Letters*, *Ecology*, *Journal of Applied Ecology*, and *Global Change Biology*. E-mail: yfbai@ibcas.ac.cn.

■责任编辑：文彦杰

chinaXiv:202303.08973v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08973v1

参考文献（双语版）

1 White R P, Murray S, Rohweder M. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystems. Washington: World Resources Institute, 2000.

2 白永飞, 黄建辉, 郑淑霞, 等. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制. 植物生态学报, 2014, 38(2): 93-102.
Bai Y F, Huang J H, Zheng S X, et al. Drivers and regulating mechanisms of grassland and desert ecosystem services. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(2): 93-102. (in Chinese)

3 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
Department of Veterinary Medicine of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, National Animal Husbandry Station. Grassland Resources in China. Beijing: China Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)

4 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997, 30(6): 2-10.
Li B. The rangeland degradation in North China and its preventive strategy. Scientia Agricultura Sinica, 1997, 30(6): 2-10. (in Chinese)

5 白永飞, 潘庆民, 邢旗. 草地生产与生态功能合理配置的理论基础与关键技术. 科学通报, 2016, 61(2): 201-212.
Bai Y F, Pan Q M, Xing Q. Fundamental theories and technologies for optimizing the production functions and ecological functions in grassland ecosystems. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 201-212. (in Chinese)

6 韩俊. 中国草原生态问题调查. 上海: 上海远东出版社, 2011.
Han J. Survey on Ecological Issues in China's Grasslands. Shanghai: Shanghai Far East Publishers, 2011. (in Chinese)

7 杜青林. 中国草业可持续发展战略. 北京: 中国农业出版社, 2006.
Du Q L. Sustainable Development Strategy of China's Grassland Industry. Beijing: China Agriculture Press, 2006. (in Chinese)

8 Daily G C. Nature's services societal dependence on natural ecosystems. The Bryologist, 1998, 101: 475.

9 Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being. Washington DC: Island Press, 2005.

10 白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究. 植物生态学报, 2018, 42(3): 261-264.
Bai Y F, Chen S P. Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: Stock, rate and potential. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(3): 261-264. (in Chinese)

11 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. 水土保持研究, 2016, 23(5): 256-260.
Wu D, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Spatiotemporal dynamics of water regulation service of grassland ecosystem in China. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 256-260. (in Chinese)

12 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
Gong S H, Xiao Y, Zheng H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455-2462. (in Chinese)

13 黄麟, 曹巍, 吴丹, 等. 西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征. 自然资源学报, 2016, 31(4): 543-555.
Huang L, Cao W, Wu D, et al. The temporal and spatial variations of ecological services in the Tibet Plateau. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 543-555. (in Chinese)

14 张雪峰, 牛建明, 张庆, 等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局. 干旱区研究, 2016, 33(4): 814-821.
Zhang X F, Niu J M, Zhang Q, et al. Spatial pattern of water

chinaXiv:202303.08973v1

conservation function in grassland ecosystem in the Xilin River Basin, Inner Mongolia. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 814-821. (in Chinese)

15 Sun J, Liu Y, Zhou T C, et al. Soil conservation service on the Tibetan Plateau, 1984-2013. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2018, 109(3-4): 445-451.

16 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-376.

Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 365-376. (in Chinese)

17 王洋洋, 肖玉, 谢高地, 等. 基于RWEQ的宁夏草地防风固沙服务评估. 资源科学, 2019, 41(5): 980-991.

Wang Y Y, Xiao Y, Xie G D, et al. Sand-fixing function of the grassland ecosystem in Ningxia based on the revised wind erosion model. Resources Science, 2019, 41(5): 980-991. (in Chinese)

18 江凌, 肖燚, 饶恩明, 等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747.

Jiang L, Xiao Y, Rao E M, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3734-3747. (in Chinese)

19 徐柱, 闫伟红, 刘天明, 等. 中国草原生物多样性、生态系统保护与资源可持续利用. 中国草地学报, 2011, 33(3): 1-5.

Xu Z, Yan W H, Liu T M, et al. Grassland biodiversity and ecological system protection and sustainable utilization of resources in China. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(3): 1-5. (in Chinese)

20 赵宝玉. 中国天然草地有毒有害植物名录. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.

Zhao B Y. Directory of Poisonous and Injurious Plants in Natural Grassland of China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)

21 Bai Y F, Wu J G, Clark C M, et al. Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(6): 1204-1215.

22 Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(5): 1023-1034.

23 Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431(7005): 181-184.

24 谢高地, 张昌顺, 张林波, 等. 保持县域边界完整性的中国生态区划方案. 自然资源学报, 2012, 27(1): 154-162.

Xie G D, Zhang C S, Zhang L B, et al. China's county-scale ecological regionalization. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 154-162. (in Chinese)

25 Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.

26 Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Applying value transfer method for eco-service valuation in China. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(1): 51-59.

27 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.

Chen Z X, Zhang X S. The value of ecosystem benefits in China. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1): 17-22. (in Chinese)

28 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.

Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jia L Q, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland. Acta Ecologica Sinica,

ChinaXiv合作期刊

2004, 24(6): 1101-1110. (in Chinese)

29 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 45-50.

Ouyang Z Y, Wang R S. Ecosystem services and their economic valuation. World Sci-Tech R&D, 2000, 22(5): 45-50. (in Chinese)

30 谢高地, 张钇锂, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.

Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 47-53. (in Chinese)

31 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.

Fu B J, Liu G H, Chen L D, et al. Scheme of ecological regionalization in China. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 1-6. (in Chinese)

chinaXiv:202303.08973v1